

ОЦІНКА САНІТАРНОГО СТАНУ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

В.П. Ландін¹, Т.Л. Кучма², В.В. Гуреля³, В.А. Захарчук²,
В.Л. Соломко², В.П. Фещенко²

¹ Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України (м. Київ, Україна)
e-mail: vlad_land@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4612-3682

² Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: tanuakuchma@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9328-5919
e-mail: agroecology_naan@ukr.net

e-mail: swls@ukr.net

e-mail: mr_yp@i.ua

³ Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)
e-mail: gurelya.v@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8283-0152

Висвітлено зростання площ патологічного всихання хвойних насаджень і масового ушкодження деревостанів шкідниками й хворобами лісу в багатьох країнах світу та в Україні упродовж двох останніх десятиріч. В умовах малолісної України проблеми погіршення стану лісів, зниження їх продуктивності і стійкості до несприятливих чинників середовища стали першочерговими у зв'язку з необхідністю переходу лісового господарства на сталий розвиток. Упродовж останніх років у лісах Українського Полісся спостерігається активізація лісопатологічних процесів, які носять хронічний характер та призводять до всихання соснових насаджень. Встановлено, зокрема за даними дистанційного зондування, що у багатьох випадках значне всихання деревостанів відбувається швидкими темпами, часто впродовж одного вегетаційного періоду, причому у середньовікових, пристигаючих, стиглих та перестійних насадженнях природного походження, у сприятливих для зростання сосни звичайної лісорослинних умовах. Наголошено, що вже у 2003 р. у лісах підприємств Державного комітету лісового господарства України суцільні санітарні рубки у всихаючих насадженнях проводились на площі понад 11,5 тис. га, а вибіркові — на площі майже 140 тис. га. Наразі площа лісів, які потребують негайних заходів боротьби з хворобами та шкідниками перевищила 370 тис. га (понад 6% земель вкритих лісом). Акцентуємо увагу, що ефективний захист лісів від шкідників і хвороб можливий за умов оперативного виявлення і моніторингу вогнищ розмноження шкідників та інфекцій. Запропоновано впровадження супутникового моніторингу лісових екосистем. Обґрунтовано, що у сучасних умовах для оцінки патологічних процесів у лісах прогресивним і економічно виправданим методом є дистанційне зондування (ДЗ) з космічних апаратів.

Ключові слова: лісові насадження, всихання хвойних лісів, вогнища розмноження шкідників, супутниковий моніторинг, дані дистанційного зондування.

ВСТУП

В останні десятиріччя в більшості європейських країн, а також в Україні і Білорусі та країнах Азії спостерігається патологічне всихання хвойних лісів [1–3]. Причини загибелі лісових насаджень ще достеменно не досліджені, але широкомасштабне

всихання лісових насаджень у багатьох країнах одночасно свідчить про глобальність згаданих процесів. На думку окремих вчених всихання лісів, найбільш імовірно, пов'язано з циклічними планетарними процесами, що останнім часом посилюються антропогенним впливом на ліси, який проявляється у підвищенні середньорічної температури повітря та зниженні його вологості на більшій частині земної кулі [2; 4–9].

Сукупна дія цих чинників викликає зниження біологічної стійкості лісових екосистем та створює сприятливі умови для заселення шкідниками. В Українському Поліссі у зв'язку з кліматичними змінами склалися сприятливі умови для повсюдного поширення та розмноження небезпечних шкідників лісу, зокрема групи комах-ксилофагів. Зазначені шкідники (переважно верхівковий і шестизубий короїди, малий та великий соснові лубоїди) заселяють дерева сосни звичайної і сприяють поширенню в їх провідних тканинах грибів родини офіостомових, що призводить до швидкої загибелі соснових насаджень на значних площах [9].

Найбільшого поширення в соснових насадженнях Полісся набув верхівковий короїд *Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827: Curculionidae, Scolytinae) який є одним із найбільш помітних чинників, що призводить до всихання соснових лісів України в останні роки. Він першим заселяє ослаблені насадження та має здатність відтворюватись в 2-х поколіннях за рік. Заселені цим видом дерева приваблювали менш агресивних шкідників [3]. За даними Державного агентства лісових ресурсів в Україні станом на 2019 р. площа всихання соснових лісів за участі короїдів перевищує 222 тис. га [8].

До основних ознак сучасного погіршення стану лісів України, як і Європи загалом, належать масове всихання деревостанів, збільшення в лісових насадженнях осередків шкідливих комах і вогнищ грибових захворювань, послаблення гомеостатичних зв'язків між окремими компонентами лісових ценозів тощо. Площа лісів, які потребують негайних заходів боротьби з хворобами та шкідниками перевищила 370 тис. га (понад 6% земель вкритих лісом).

У таких умовах надзвичайно актуально стає розробка методів своєчасного виявлення та моніторингу розвитку кризових явищ, зокрема поширення шкідників і хвороб, та визначення площ ушкодження деревостанів за допомогою даних дистанційного зондування.

Тому мета нашого дослідження полягала у розробці методології моніторингу

поширення осередків усихання лісових насаджень Житомирського Полісся внаслідок ураження верхівковим короїдом за даними супутникової зйомки.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вивчення особливостей лісорослинних умов і характеристик насаджень, які є сприятливими для комах-шкідників, є важливими для прогнозування та вчасного запобігання негативному впливу цих чинників на стан лісів, особливо в межах Українського Полісся. Таким дослідженням присвячені останні наукові публікації В. Мешкової, В. Ткач, О. Борисенка, Я. Дідуха, П. Яворського, В. Бондаря та ін. [2–4; 6; 8]. Зокрема, у дослідженнях В. Мешкової та О. Борисенка особлива увага приділяється аналізу причин, факторів та проявів активізації всихання соснових насаджень. Також досліджується зв'язок між способом життя та життєдіяльністю шкідливих комах, зокрема верхівкового короїда, та фазами вегетації лісових насаджень. Виявлені особливості є важливими для обґрунтування оптимального методу моніторингу за даними дистанційного зондування. Окремо у дослідженнях Seidl (2016), Ayres та Nicke (2013) аналізується вплив кліматичних факторів як на життєвий цикл комах, так і на механізми стійкості дерев у планетарному чи великоформатному (наприклад, всеєвропейському) масштабі. Такий підхід, на думку авторів, дає можливість більш комплексно оцінити ризики та регіональні особливості поширення шкідників.

Результати застосування методів дистанційного зондування для моніторингу поширення шкідників були опубліковані у наукових статтях таких дослідників, як А. Крилов, Н. Владімірова, А. Маслов, White, J. Wulder, М. Артюшенко, О. Томченко та ін. Зокрема, аналізуються переваги і недоліки різних методів ДЗ, до яких належать методи зйомки безпілотником, лідарна зйомка та супутникові знімки з високим просторовим розрізненням (краще 1 м).

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили впродовж 2017–2019 рр. у лісових насадженнях державних лісогосподарських підприємств північної частини Житомирської обл. — ДП «Овруцьке ЛГ», ДП «Народицьке СЛГ». Формування бази даних еталонів поширення патологічних процесів у лісах для автоматизованого дешифрування супутникових знімків проводилось методом маршрутного обстеження. Решта досліджень виконувались за загальнонауковими методами: аналіз; синтез; порівняння; математичні та статистичні методи для аналізу дослідних даних.

Для створення картографічної основи території дослідження було виконано збір тематичних картографічних матеріалів: топографічна карта території дослідження у масштабі 1:100 000; електронні карти з межами лісництва та кварталною сіткою; карта-схема протипожежного упорядкування ДП «Народицьке СЛГ» у масштабі 1:100000 за даними лісовпорядкування 2008 р. Для збереження даних у одному форматі, наявні електронні карти було конвертовано у формат *.shp. Карта-схема протипожежного упорядкування була відсканована, геоприв'язана та збережена у форматі geotiff у програмному середовищі QGIS.

Дані супутникової зйомки Sentinel-2 Європейського космічного агентства, які використовувались як базові для дистанційного моніторингу стану лісових масивів, були завантажені за допомогою каталогу даних GoogleEarthEngine (<https://earthengine.google.com/>).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Завантаження на попередня обробка даних ДЗЗ. Для оцінки поширення шкідників було проведено пошук усіх доступних супутникових знімків із хмарністю не вище 10% з травня 2017-го року до жовтня 2019-го року. Результат пошуку виявив 211 супутникових знімків за вказаний період. При цьому один супутниковий знімок Sentinel-2 є набором одночасно зроблених

зображень у різних спектральних діапазонах (набір спектральних каналів знімка). Кожен канал знімка зберігається як окремий растровий файл, тому на першому етапі обробки даних потрібно виконати синтез (злиття) каналів одного знімка з урахуванням спектральних властивостей пошкоджених ділянок лісу. Далі потрібно зробити мозаїку (з'єднання) зображень знімків (сцен зйомки) за одну дату. Попередню обробку виконували за допомогою програмного коду у середовищі Google EarthEngine (<https://earthengine.google.com/>).

З отриманого набору знімків було вибрано лише ті зображення, на яких контрастно проявлялися ознаки усихання сосни. Як було підтверджено даними у науковій літературі, почервоніння сосни унаслідок ураження короїда з огляду на цикл розвитку цього шкідника, ставало помітним у кінці червня, зберігало контрастність до початку вересня і лишалося помітним до кінця жовтня, проте з меншою контрастністю. Тому для моніторингу були вибрані лише дані зйомки з кінця червня до середини жовтня, інші знімки у дослідженні не використовувались. За 2019 р. через високу хмарність у липні у результаті було отримано лише зображення за серпень і початок вересня, зокрема за такі дати: 06.08.2019; 19.08.2019; 21.08.2019; 24.08.2019; 27.08.2019; 29.08.2019 та 03.09.2019.

Формування бази даних еталонів для автоматизованої класифікації зображень. На наступному етапі необхідно зібрати еталонні дані з локалізацією уражених короїдом дерев, які будуть використовуватися при автоматизованому дешифруванні супутникових знімків. Для цього проводиться маршрутне обстеження поширення патологічних процесів у лісах, або аерофотозйомка безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Аерофотозйомка безпілотним літальним апаратом виконується за сприятливих погодних умов: малохмарне небо, видимість — необмежена. Завдяки програмному забезпеченню БПЛА до кожного знімка присвоюються географічні координати.

нати місцезнаходження БПЛА в момент фотофіксації. Фотознімки записуються на цифровий носій у форматі JPEG (рис. 1).

Отримані аерофотознімки обробляються в програмному забезпеченні Agisoft PhotoScan Professional з метою побудови тривимірної моделі та ортофотоплану дослідної ділянки лісу (рис. 2).

Для порівняння на рис. 3 наведено ортофотоплан тестової території, створений за результатами зйомки БПЛА у липні 2018 р. Помітно, що у 2018 р. на тестовій території знаходилося близько 20 нових осередків ураження верхівковим короїдом, такі осередки у деяких місцях займали велику площу і охоплювали декілька десятків дерев одночасно (дерева з кроною рудого кольору). Спостерігалось інтенсивне розширення площі ураження попереднього 2017-го року (сірі дерева на рис. 3, а).

У 2019-му році спостерігається лише декілька нових осередків ураження, зокрема у південно-східній частині ортофотоплану, що охоплюють невелику площу, декілька дерев одночасно. Значного розширення

площі ураження попереднього 2018-го року не спостерігається, з чого можна робити висновок про зниження спалаху поширення верхівкового короїда.

Для виявлення пошкоджених лісових масивів та осередків всихання сосни, зокрема внаслідок ураження верхівковим короїдом, досить ефективно можуть бути застосовані методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Зокрема застосовують такі методи ДЗЗ: авіаційна і космозйомка, аеровізуальне обстеження, лідарна зйомка. На рис. 3 показано приклад порівняння зйомки території БПЛА та супутником Sentinel-2 у межах Народицького лісництва Житомирської обл.

На отриманому ортофотоплані та супутниковому зображенні можна побачити сірі та руді плями лісу. «Сірий» ліс — це раніше уражені короїдом дерева, які вже втратили хвою. Як правило, це ділянки усихання сосни минулого року. А «рудий» ліс — це дерева, які тільки зазнали ураження однак уже почали всихати, про що свідчить відмерла хвоя з рудим забарвленням.



Рис. 1. Результати аерофотозйомки безпілотним літальним апаратом, серпень 2019 р.



Рис. 2. Ортофотоплан тестової території за результатами зйомки БПЛА у серпні 2019 р.

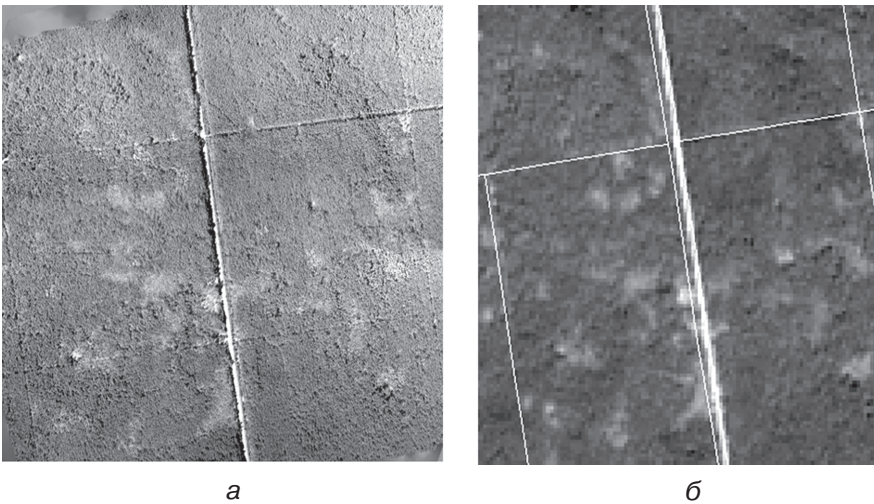


Рис. 3. Прояв уражених соснових насаджень на аерокосмічних зображеннях: а) зйомка БПЛА; б) супутникова зйомка Sentinel-2 (сосни, що всихають виділяються у вигляді червоних плям)

Для виконання лісотаксаційних робіт найчастіше застосовують аеровізуальне обстеження. Перевагою візуального методу є відносно низька вартість та можливість виявлення навіть окремих уражених дерев [10; 11]. Недоліком є висока трудоемність та ймовірність пропуску пошкоджених ді-

лянок за необхідності обстеження великої території.

Застосування обстеження за допомогою безпілотних літальних апаратів дає змогу істотно знизити витрати робочого часу, охоплювати великі території одразу та зменшити можливість прогалин певних

масивів лісу, однак часто виникають труднощі з визначенням точних площ уражених лісових масивів через складність географічної прив'язки та геометричної корекції матеріалів зйомки.

Дешифрування матеріалів аерофото зйомки, у тому числі лідарної, забезпечує високу точності та деталізацію, однак через високу вартість такого методу низькою є частота обстеження, що не дає можливість ефективно відстежувати виникнення нових осередків шкідників упродовж сезону вегетації.

Застосування супутникової зйомки з надвисоким просторовим розрізненням (краще 1 м) дає змогу отримати результати з високою точністю дешифрування. Наприклад, White [12], використовуючи знімки супутника Ikonos, отримав точність оцінки площ всихання хвойних дерев на рівні 71% у випадку низького рівня ураження шкідниками, та 92% у випадку високого ступеня ураження шкідниками лісового масиву. Однак дані ДЗЗ із надвисоким просторовим розрізненням не можуть забезпечити необхідну оперативність та частоту зйомки через їхні технічні особливості й високу вартість. Ще одним істотним недоліком цих даних є низьке спектральне розрізнення, що ускладнює завдання автоматизованого дешифрування знімків.

З огляду на викладене вище, найбільш оптимальним методом моніторингу ушкоджених шкідниками лісових масивів упродовж сезону вегетації є застосування даних супутникової зйомки з середнім та високим просторовим розрізненням (10–30 м). До таких видів зйомки належать знімки супутників Landsat-8 (15–30 м), та Sentinel-2 (10 м). Ці супутникові системи здійснюють великий обсяг мультиспектральної зйомки упродовж року, формуючи багаторазове покриття території дослідження. Ефективність застосування цих знімків для виявлення пошкоджених шкідниками хвойних лісових масивів підтверджується численними науковими дослідженнями [13]. Оскільки просторове розрізнення супутникових даних Sentinel-2 є вищим, ніж у даних Landsat-8 у якості базових матеріа-

лів для моніторингу доцільно застосовувати дані Sentinel-2.

Аналіз спектральних властивостей пошкоджених ділянок лісу. Основною перевагою застосування методів дистанційного зондування для виявлення пошкоджених ділянок лісу є можливість виявлення змін у характері взаємодії наземних об'єктів з електромагнітним випромінюванням на різній довжині хвилі (у різних спектральних діапазонах).

Спектральний коефіцієнт яскравості (СКЯ), що формує значення пікселя супутникового знімка є складною комбінацією відбитого випромінювання від крон дерев, крон 2-го ярусу, підросту, підліску, живого надґрунтового покриву, ґрунту, а також тіні сусідніх дерев. Загалом спектральною особливістю рослинності є відносно невисоке значення відбиття у червоній частині спектра та високе відбиття у ближній інфрачервоній частині спектра. При пошкодженні рослинності та зниження їх фотосинтетичної активності відбиття у червоному каналі збільшується, а в інфрачервоному відповідно знижується. Окрім того, значно збільшується відбиття у середньому інфрачервоному каналі, що пов'язано зі зниженням вмісту вологи у пошкоджених деревах [11].

Отже, при пошкодженні дерев, особливо у випадку ураження верхівковим короїдом, змінюється відбиваюча здатність крони сосни, зменшується внесок верхньої крони у спектральний коефіцієнт яскравості та збільшується вплив ґрунту, підросту, підліску та надґрунтового покриву [11].

При використанні мультиспектральних супутникових даних високого та середнього просторового розрізнення, зокрема для моніторингу уражених шкідниками ділянок лісу, необхідно враховувати, що крона окремого дерева займає на таких знімках менше одного пікселя, що істотно ускладнює виділення окремих відмерлих дерев.

Варто також відзначити, що, окрім відмирання дерев, зміну у спектральній відбиваючій здатності ділянок лісу упродовж вегетаційного періоду спричинює зміна фенологічних фаз, вологість ґрунту, вміст вологи у рослинності та ін. При аналізі на-

бору супутникових даних за один рік було виявлено, що ушкоджені дерева на території дослідження ідентифікуються найкраще за період з липня по серпень та проявляються на знімках до початку грудня. З січня по червень якість дешифрування пошкоджених лісових масивів знижується.

На прикладі території ДП «Народицьке лісове господарство» досліджували зміну спектральних характеристик лісового покриття при пошкодженні шкідниками (рис. 4).

Як видно з рис. 5, найбільша відмінність між інтенсивністю відбиття електромагнітного випромінювання для здорових ділянок лісу та уражених шкідниками фіксується у каналах В4 і В10. Помітна також різниця у каналах В5, В7 і В12. Відповідно ці канали супутникового знімка Sentinel-2 мають використовуватися для синтезу та автоматизованого дешифрування пошкоджених шкідниками дерев.

Також аналізували час настання максимальної контрастності спектрального сигналу уражених і неуражених дерев, і було зафіксовано два піки максимальної різниці — на початку липня, і на кінець серпня, що може збігатися з піком поширення другого покоління короїда. При цьому осередки ураження, які проявляються у липні, до кінця серпня дещо втрачають контрастність внаслідок зміни рудого забарвлення

крони на сірій та втрату хвої. Тому для ефективного моніторингу доцільно використовувати ряд наявних знімків впродовж сезону вегетації, доповнюючи дані дешифрування за липень, даними за серпень та початок вересня.

Автоматизована класифікація супутникового зображення для виділення зон усихання сосни. Застосування методу автоматизованого дешифрування вимагає, з одного боку, значного часу для підбору необхідного алгоритму та його параметрів та достатньо великої навчальної вибірки і наземної верифікації результатів, однак цей метод має більшу ефективність та стабільність результатів [11].

На основі створеної бази даних еталонних об'єктів — ушкоджених короїдом дерев — отриманих у результаті маршрутного наземного обстеження та зйомки БПЛА, було застосовано метод максимальної подібності з синтезом каналів В4, В5, В7, В10, В12. Ці канали мали найвищу контрастність зі здоровими деревами у результаті аналізу спектральних властивостей пошкоджених ділянок лісу.

Метод автоматизованої класифікації зображення за максимальної подібності полягає у тому, що спочатку потрібно вибрати еталонні об'єкти, тобто виділити місця, де точно відомо, що там знаходяться ураже-

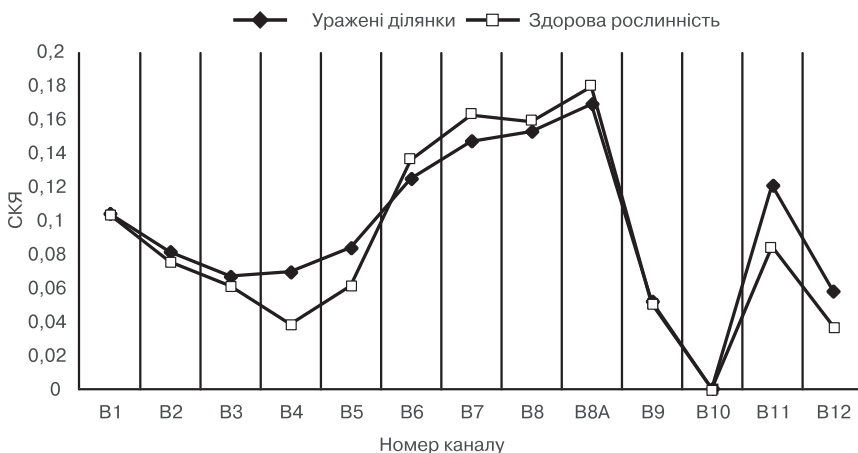


Рис. 4. Порівняння СКЯ для здорових та уражених шкідниками ділянок лісу у різних спектральних каналах Sentinel-2

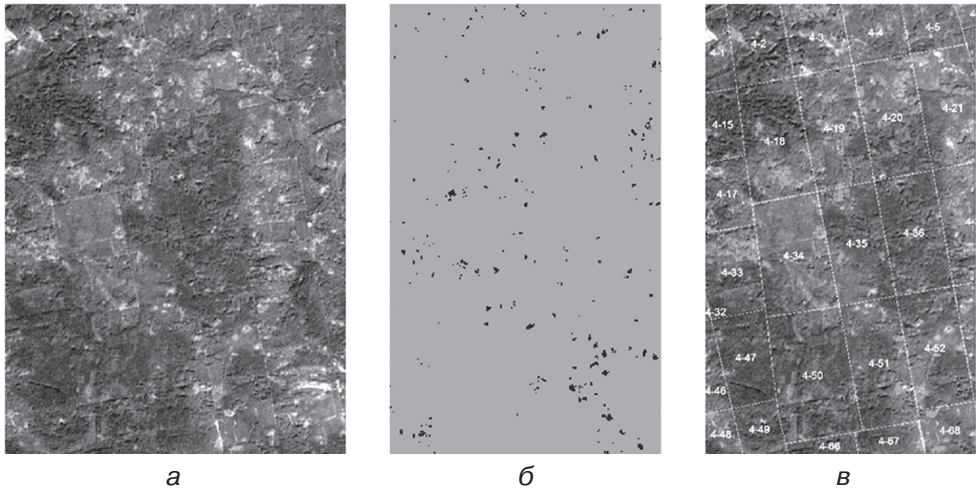


Рис. 5. Класифікація супутникового знімка Sentinel-2 для виявлення осередків усихання сосни внаслідок ураження короїдом: *а*) вихідний знімок Sentinel-2 за 30 липня 2017 р.; *б*) растровий файл з результатом класифікації методом найбільшої подібності; *в*) супутниковий знімок Sentinel-2 з векторним шаром виділених осередків усихання сосни (червоний колір) та кварталною сіткою (жовтий колір)

ні шкідниками дерева (отримані у результаті маршрутного обстеження, зйомки БПЛА та аерофотознімків), і далі, використовуючи цей набір еталонів, автоматично виділити схожі за спектральними характеристиками ділянки лісу на супутниковому знімку.

Для класифікації використано модуль напівавтоматичної класифікації в QGIS (Semi-Automatic Classification Plugin for QGIS). У результаті на основі кожного знімка було створено растрове зображення з виділеними всохлими деревами, які автоматично можуть бути конвертовані у векторний формат (рис. 5).

Отже, для того, щоб легко можна було порахувати площі та кількість уражень у межах лісових кварталів і планувати санітарні заходи, результати дешифрування, що отримані у растровому форматі, конвертуються у векторний формат (*.shp) з осередками всихання дерев. Дані дешифрування за різні дати спостереження впродовж сезону вегетації були злиті в один полігон за допомогою інструментів Union та Dissolve, програмного середовища QGIS.

Порівняння даних аерофотозйомки та результатів автоматизованої класифікації

супутникових знімків Sentinel-2 (рис. 6) засвідчує досить високу достовірність виявлення осередків всихання сосни на супутниковому знімку, зокрема досить точно дешифрувалася кількість, розташування, форма та площа осередків всихання дерев, з урахуванням просторового розрізнення супутникових знімків Sentinel-2 (розмір пікселя 10 м).

Моніторинг динаміки осередків усихання методами дистанційного зондування Землі — поквартальна статистика. Для кожного визначеного шляхом дешифрування знімків полігона пошкодженої ділянки лісу (осередку всихання дерев) було пораховано його площу, та розраховано зональну статистику — загальну площу та кількість осередків всихання дерев у межах кожного кварталу лісу. Дані були зведені на три часові проміжки: площі осередків усихання 2017-го року, площі нових осередків усихання, виявлених у 2018-му році, та площі нових цьогорічних осередків всихання дерев станом на вересень 2019-го року. Результати розрахунку кварталної статистики представлені у таблиці. У таблиці включені лише квартали, в яких

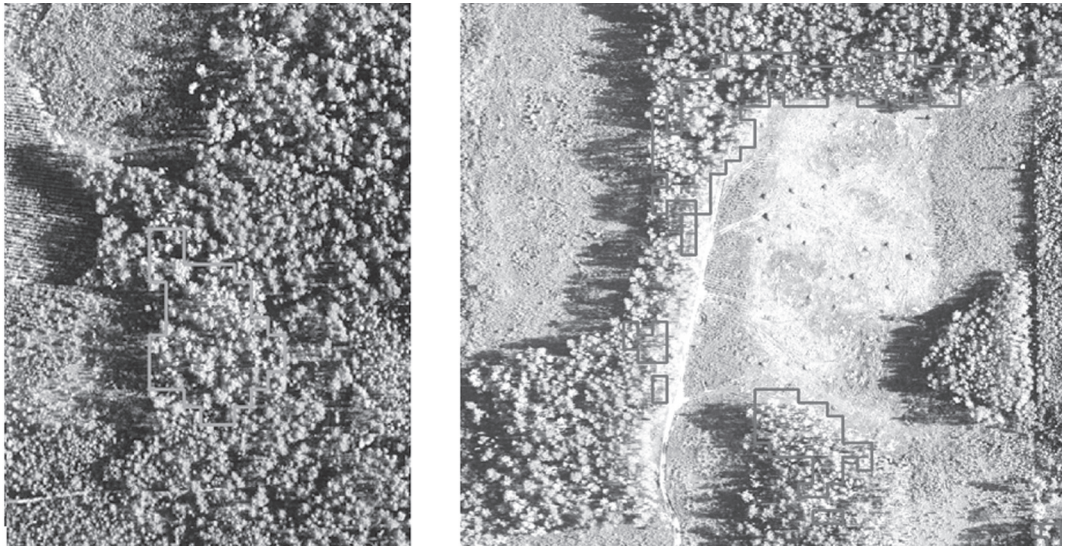


Рис. 6. Порівняння даних аерофотозйомки та результатів автоматизованої класифікації супутникових знімків Sentinel-2 (полігони, виділені синім контуром)

були виявлені прояви усихання дерев у 2017–2019 рр.

За результатами квартальної статистики, всихання насаджень ДП «Народицьке СЛГ» за 2017–2019 рр. можна оцінити як загальну площу осередків всихання насаджень, так і виявити динаміку поширення осередків у часі. Аналіз даних табл. дає можливість зробити висновок, що за

даними супутникового знімання найбільша інтенсивність поширення верхівково-го короїда спостерігалася у 2017-му році, а у 2019-му році приріст нових осередків усихання сосни в межах лісів ДП «Народицьке СЛГ» знизився до 2,35% від загальної площі осередків всихання в 2017 р., а в 2018 р. цей показник дорівнював 24,1%.

Узагальнені результати квартальної статистики всихання насаджень ДП «Народицьке СЛГ» за 2017–2019 рр.

Лісництво	Площа осередків всихання у 2017-му році, га	Площа нових осередків всихання у 2018-му році, га	Площа нових осередків всихання у 2019-му році, га	Загальна площа осередків всихання за 2017–2019 рр.
Базарське	438,2	119,0	16,9	574,1
Давидківське	295,4	55,8	5,9	357,1
Закусилівське	203,2	50,1	1,8	255,1
Заліське	365,1	53,0	5,6	423,7
Кліщівське	290,2	70,5	9,7	370,5
Народицьке	330,3	116,8	3,6	450,7
Радчанське	167,0	39,0	5,8	211,8
Разом по СЛГ	2089,5	504,2	49,2	2642,9

ВИСНОВКИ

Для оцінки санітарного стану лісів, виявлення пошкоджених лісових масивів та осередків усихання сосни, зокрема унаслідок ураження верхівковим короїдом, досить ефективно можуть бути застосовані методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ): авіаційне (знімання із застосуванням БПЛА) і супутникове знімання, аеро-візуальне обстеження, лідарна зйомка.

При виконанні лісотаксаційних робіт найчастіше застосовують аеро-візуальне обстеження. Перевагою візуального методу є відносно низька вартість та можливість виявлення навіть окремих уражених дерев. Недоліком є висока трудоємність та ймовірність пропуску пошкоджених ділянок за необхідності обстеження великої території. Обстеження за допомогою безпілотних літальних апаратів дає змогу знизити затрати робочого часу, охоплювати великі території одразу та зменшити можливість пропуску певних масивів лісу, однак часто виникають труднощі з визначенням точних площ уражених лісових масивів через складність географічної прив'язки та геометричної корекції матеріалів зйомки.

Дешифрування матеріалів аерофото-зйомки, у т. ч. лідарної, забезпечує високу точність та деталізацію, однак через високу вартість такого методу низькою є частота обстеження, що не дає змоги ефективно відстежувати виникнення нових осередків шкідників упродовж сезону вегетації.

Застосування супутникової зйомки з надвисоким просторовим розрізненням (0,5–1,0 м) дає можливість отримати результати з високою точністю дешифрування. Однак дані ДЗЗ із надвисоким просторовим розрізненням не можуть забезпечити необхідну оперативність та частоту зйомки через їх технічні особливості й високу вартість. Ще одним істотним недоліком цих даних є низьке спектральне розрізнення, що ускладнює завдання автоматизованого дешифрування знімків.

За сучасних технічних можливостей найбільш оптимальним методом моніторингу ушкоджених шкідниками лісових масивів упродовж сезону вегетації є застосування даних супутникового знімання з середнім та високим просторовим розрізненням (10–30 м). До таких видів зйомки належать знімки супутників Landsat-8 (15–30 м) та Sentinel-2 (10 м). Ці супутникові системи здійснюють великий обсяг мультиспектральної зйомки упродовж року, формуючи багаторазове покриття території дослідження. Ефективність застосування таких знімків для виявлення пошкоджених шкідниками хвойних лісових масивів підтверджується численними науковими дослідженнями, оскільки просторове розрізнення супутникових даних Sentinel-2 є вищим, ніж у даних Landsat-8 у якості базових матеріалів для моніторингу доцільно застосовувати дані Sentinel-2.

ЛІТЕРАТУРА

1. Seidl R. et al. Small beetle, large-scale drivers: how regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle. *Journal of Applied Ecology*. 2016. No 53(2). P. 530–540. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12540>.
2. Ткач В.П., Мешкова В.Л. Сучасні проблеми формування та відтворення біологічно стійких соснових лісів України в умовах змін клімату. *Соснові ліси: Сучасний стан, існуючі проблеми та шляхи їх вирішення*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 12–13 черв. 2019 р.). Київ, 2019. С. 70–78.
3. Meshkova V.L., Borysenko O.I. Prediction for bark beetles caused desiccation of pine stands. *Forestry and Forest Melioration*. 2018. No. 132. P. 155–161.
4. Дідух Я.П. Екологічні аспекти глобальних змін клімату: причини, наслідки, дії. *Вісник НАН країни*. 2009. № 2. С. 34–44.
5. Семенова И.Г. Оценка засушливых условий на Украине в конце XX – в начале XXI столетия. *Вестник Балтийского федерального университета им. Канта*. 2014. Вып 2. С. 20–29.
6. Яворський П.П. Вплив змін клімату на лісові екосистеми. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2015. № 6. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/9995>.
7. Мартынюк В.С., Темуриянц Н.А., Владимирский Б.М. У природы нет плохой погоды: космическая погода в нашей жизни. Киев: Издатель В.С. Мартынюк, 2008. 212 с.

8. Бондар В.Н. Причины та наслідки погіршення санітарного стану лісів і деградації лісових екосистем в Україні. *Соснові ліси: Сучасний стан, існуючі проблеми та шляхи їх вирішення*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 12–13 черв. 2019 р.). Київ, 2019. С. 8–17.
9. Мешкова В.Л., Борисенко О.І. Динаміка площі всихання лісів, спричиненого верхівковим короїдом у ДП «Тетерівське ЛГ». *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2017. № 131. С. 171–178.
10. Маслов А.А. Космический мониторинг лесов России: современное состояние, проблемы и перспективы. *Лесной бюллетень*. 2006. № 1 (31). С. 12–17.
11. Крылов А.М., Владимировна Н.А. Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки. *Геоматика*. 2011. № 3. С. 53–57.
12. White J. et al. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using the area-based approach. Victoria: Canadian Forest Service Canadian Wood Fibre Centre, 2013. 50 p. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc2013-132>.
13. Артюшенко М.В., Томченко О.В. Метод контроля заселения лесов верхинным короидом по данным дистанционного зондирования. *Соснові ліси: Сучасний стан, існуючі проблеми та шляхи їх вирішення*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 12–13 черв. 2019 р.). Київ, 2019. С. 94–96.

REFERENCES

1. Seidl, R. et al. (2016). Small beetle, large-scale drivers: how regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle. *Journal of Applied Ecology*, 53(2), 530–540 [in English].
2. Tkach, V.P. & Meshkova, V.L. (2019). Suchasni problemy formuvannya ta vidtvorennya biolohichno stiykykh sosnovykh lisiv Ukrainy v umovakh zmin klimatu [Modern problems of formation and reproduction of biologically stable pine forests of Ukraine in conditions of climate change]. *Sosnovi lisy: Suchasnyy stan, isnuuyuchi problemy ta shlyakhy yikh vyryshennya: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Pine forest: current status, existing challenges and ways forward: Proceedings of International Scientific and Practical Conference] (pp. 70–78). Kyiv [in Ukrainian].
3. Meshkova, V.L. & Borysenko, O.I. (2018). Prediction for barkbeetles caused desiccation of pine stands. *Forestry and Forest Melioration*, 132, 155–161 [in English].
4. Didukh, YA.P. (2009). Ekolohichni aspekty hlobalnykh zmin klimatu: prychny, naslidky, diyi [The environmental aspects of global climate change: causes, effects, actions]. *Visnyk NAN Ukrainy – Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 34–44 [in Ukrainian].
5. Semenova, Y.H. (2014). Otsenka zasushlyvykh uslovyi na Ukraine v kontse XX – v nachale XXI stolyetiya [Assessment of arid conditions in Ukraine in the late twentieth – early twenty-first century]. *Vestnyk Baltiyskoho federalnoho universytetu im. Kanta – Bulletin of Immanuel Kant Baltic Federal University*, 2, 20–29 [in Russian].
6. Yavorsky, P.P. (2015). Vplyv zmin klimatu na lisovi ekosystemy [Influence of climate change on forest ecosystems]. *Lisove ta sadovo-parkove hospodarstvo – Forestry and horticulture*. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/9995> [in Ukrainian].
7. Martynuk, V.S., Temuryants, N.A. & Vladymyrsky, V.M. (2008). *U prypryrodi net plokhoyi pohody: kosmichna pohoda v nashiy zhytyi* [Nature does not have bad weather: space weather in our lives]. Kyiv [in Russian].
8. Bondar, V.N. (2019). Prychny ta naslidky pohirshennya sanitarnoho stanu lisiv ta dehradatsiyi lisovykh ekosystem v Ukraini [Reasons and consequences of worsening of forests vitality and forest ecosystems' degradation in Ukraine]. *Sosnovi lisy: Suchasnyy stan, isnuuyuchi problemy ta shlyakhy yikh vyryshennya: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Pine forest: current status, existing challenges and ways forward: Proceedings of International Scientific and Practical Conference] (pp. 94–96). Kyiv [in Ukrainian].
9. Meshkova, V.L. & Borisenko, O.I. (2017). Dynamika ploshchi vsykhannya lisiv, sprychynenoho verkhivkovym koroyidom u DP «Teteriv'ske LH» [Dynamics of forest drying area caused by bark beetle in SE Teterivsk LH]. *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiya – Forestry and agroforestry*, 131, 171–178 [in Ukrainian].
10. Maslov, A.A. (2006). Kosmicheskiy monitoring lesov Rossii: sovremennoye sostoyaniye, problemy i perspektivy [Space monitoring of Russian forests: current state, problems and prospects]. *Lesnoy byulleten – Forest Bulletin*, 1(31), 12–17 [in Russian].
11. Krylov, A.M. & Vladymyrova, N.A. (2011). Distantionnyy monitoring sostoyaniya lesov po dannym kosmicheskoy syemki [Remote monitoring of forests using remote sensing]. *Geomatika – Geomatics*, 3, 53–57 [in Russian].
12. White J. et al. (2013). A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using the area-based approach. Victoria [in English].
13. Artyushenko, M.V. & Tomchenko, O.V. (2019). Metod kontrolya zaseleniya lesov verшинnym koroyedom po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Control method of Ips acuminatus forest infestation based on remote sensing data]. *Sosnovi lisy: Suchasnyy stan, isnuuyuchi problemy ta shlyakhy yikh vyryshennya: materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Pine forest: current status, existing challenges and ways forward: Proceedings of International Scientific and Practical Conference] (pp. 94–96). Kyiv [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 26.09.2020